

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦硒(VI)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用

姚程, 胡小贞*, 卢少勇, 耿荣妹

(中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 选取太湖贡湖湾水陆交错带内的黄菖蒲、双穗雀稗、李氏禾、黄花水龙及香菇草这 5 种植物, 长江下游常见沙壤土、水陆交错带新生底质两种土壤, 模拟扰动条件下 5 种水生植物对底质氮磷释放的抑制。结果表明, 植物对底质总磷释放具有显著的抑制作用, 双穗雀稗、香菇草、黄菖蒲可以将上覆水总磷浓度控制在 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 李氏禾、黄花水龙控制在 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 李氏禾、黄花水龙试验组总磷释放率控制在 0.1 d^{-1} , 双穗雀稗、香菇草、黄菖蒲试验组控制在 0.05 d^{-1} 。植物生长增加了底质氮的赋存, 带来底质氮释放的增加, 而黄菖蒲、双穗雀稗则可以将底质总氮释放速率控制在 0.02 d^{-1} , 上覆水总氮浓度控制在 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。植物须根根长密度、根重密度、根表面积密度成为抑制底质氮磷释放的主要因素, 须根穿插增加底质中粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 从而减少了水体扰动造成的底质上扬; 同时须根在生长过程增加底质总氮含量, 吸收底质中的磷。5 种水陆交错带植物正是通过上述两种机制抑制底质中氮磷的释放, 其中黄菖蒲、双穗雀稗因为其发达的根系, 抑制氮磷物质释放的效果最佳, 其次为李氏禾、香菇草, 黄花水龙对底质氮磷释放的抑制作用在 5 种植物中最小。

关键词: 水陆交错带植物; 底质粒径; 底质氮磷; 须根根系

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0589-11 DOI: 10.13227/j.hjx.201604237

Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants

YAO Cheng, HU Xiao-zhen*, LU Shao-yong, GENG Rong-mei

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The article researched the effect of *Iris pseudacorus* L., *Paspalum distichum* L., *Leersia hexandra* Swartz, *Ludwigia peploides* and *Hydrocotyle vulgaris* on the nitrogen and phosphorus repression in sandy soil from lower reaches of Yangtze River and clay from stored littoral zone. The result indicated that plants had a significant inhibitory effect on total phosphorus release from sediment, with concentration in overlaying water below $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in *Paspalum distichum* L., *Hydrocotyle vulgaris*, *Iris pseudacorus* group, below $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in *Leersia hexandra* Swartz, *Ludwigia peploides* group; with release rate below 0.1 d^{-1} in *Leersia hexandra* Swartz and *Ludwigia peploides* group, below 0.05 d^{-1} in *Paspalum distichum* L., *Hydrocotyle vulgaris*, *Iris pseudacorus* group. While the plants were proved to aggravate total nitrogen release by accumulating in sediment, with concentration in overlaying water below $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in *Paspalum distichum* and *Iris pseudacorus* L. group; with release rate below $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Root weight density, root length density, root surface area density were major factors, which increased the proportion of particles in sediment with diameter of below $50 \mu\text{m}$, therefore decreased sediment resuspension against hydraulic disturbance; the root system also enriched total nitrogen in sediment and absorbed phosphorus from sediment. These five kinds of plants in terrestrial-aquatic transverse actually repressed nitrogen and phosphorus release from sediment in two ways mentioned above, *Paspalum distichum* L. and *Iris pseudacorus* L. possessed the best effect due to their developed root system, followed by *Leersia hexandra* Swartz and *Hydrocotyle vulgaris*, and *Ludwigia peploides* had the least effect.

Key words: littoral-zone plants; sediment diameter; nitrogen and phosphorus in sediment; root system

水陆交错带水生植物是湖泊水生态系统重要的初级生产者,是生态系统内的能量流动和物质循环的参与者,其群落结构与分布面积对湖泊水质有较大的影响^[1]。谢杰等^[2]通过研究滇池、洱海水生植物与水质之间的关系,指出湖滨水生植物可以有效减少水体中氮磷营养盐,抑制藻类,减轻水体的富营养化。方焰星等^[3]在室内水培试验中研究了石菖蒲、香菇草等水生植物对水体氮磷的去除效果,得出了水生植物具有良好去磷的效果和一定的固氮能

力。有研究者指出,湖滨带底质是氮磷物质的聚集区域,构成了湖滨生态系统潜在的内源污染^[4]。在风浪条件下湖滨带底质上扬还会进一步恶化水体,释放氮磷^[5]。湖滨带水生植物群落通过对底质中氮磷物质的同化、迁移,对水体富营养化控制,浮游生

收稿日期: 2016-04-29; 修订日期: 2016-09-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07101-014-04, 2014ZX07510-001-01)

作者简介: 姚程(1990~),男,博士研究生,主要研究方向为湖泊生态, E-mail: yao948416159@163.com

* 通信作者, E-mail: huxz@caes.org.cn

物群落稳定起到一定作用^[6]. 王磊等^[7]通过研究太湖湖滨带表层沉积物氮磷与挺水植物芦苇、茭白分布情况的相关关系,指出了两种水生植物可以通过根部有效吸收、固定氮磷. Horppila 等^[8]在芬兰南部希登韦西湖(Lake Hiidenvesi)研究指出湖滨内源磷荷载与悬浮颗粒物之间的关系受到沉水植物的影响,在沉水植物区内,表层底质含磷量较低,其上扬的悬浮颗粒物可以从水体中吸收溶解性磷,减少区域内上覆水的溶解性磷浓度. Özbay^[9]在地中海土耳其境内的卡里湖(Cali Lake)进行了野外水质监测,指出了卡里湖湖滨带的水质状况及底质的悬浮情况受到两栖蓼和狐尾藻的直接影响. 目前研究者已经指出湖滨带水生植物在抑制底质氮磷释放方面具有的重要作用,尤其是在风浪影响下湖滨带植物对底质氮磷释放的抑制作用更加明显. 本文通过选择5种常见水陆交错带植物对底质改进,研究其在模拟风浪条件下抑制底质氮磷释放的过程和效果;同时分析影响这种抑制作用的主要因素,比较几种植物的抑制效果,以期相关的研究和工程应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 植物与底质来源

试验所用的植物和部分底质土样来自于无锡贡湖湾太湖新城贡湖生态修复示范工程区(N 31°27'19.91"~31°27'25.38"、E 120°19'48.04"~120°19'56.39"),该示范区原为鱼塘,2013年退渔还湖后经过基底修复改善,于2014年5月人工植被修复后形成水陆交错带示范区. 示范区内底质主要为外来覆土,属于湖滨带生态修复区域新生底质,其孔隙度37%,含水率24%,粒径分布以100 μm以下的细小颗粒为主. 试验中还采集生态修复示范区外的沙壤底质作为试验对象,其孔隙度45%,含水率25%,粒径分布以100 μm以上的中细、中粗颗粒为主.

试验中水陆交错带植物均为长江中下游常见种类,于2014年5月人工种植后生长稳定并形成群落. 采集示范区分布面积大、生长良好的5种水生植物,包括李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)、双穗雀稗(*Paspalum distichum* L.)、香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)、黄花水龙(*Ludwigia peploides*)作为试验对象^[10-14].

1.2 试验设置

本试验装置经塑料养殖箱改造而成,如图1所示,每个养殖箱底均匀铺设20 cm底质. 5种水陆交

错带植物分别在示范工程区新生底质和沙壤底质两种底质中进行种植,设置一组平行样,两种底质分别设置空白对照组. 各组装置内水生植物栽种情况如表1所示,各组植物的栽种生物量在0.5~1.1 kg·m⁻²,植物的株高株数因不同植物种类而存在差异. 试验开始前5个试验组、1个空白组在植物栽种后加少量水,保持底质润湿,等待24 h观察栽种效果,确保试验植物与底质紧密结合. 之后各组注入纯净水,淹没植物根部至水深10 cm. 经过一周的生长适应期后开始试验,每个装置中放置曝气头,曝气量25 mL·s⁻¹,装置中上覆水流速1.9~2.5 m·s⁻¹,水力梯度15 s⁻¹.

表1 各试验组设置基本参数

Table 1 Parameters of five experimental groups and blank control group

试验组	生物量 /kg·m ⁻²	平均株高 /cm	株数 /个·m ²	底质类型
双穗雀稗	0.62	63	30	新生+沙壤
香菇草	0.5	13	260	新生+沙壤
李氏禾	0.8	50	80	新生+沙壤
黄花水龙	1.1	15	50	新生+沙壤
黄菖蒲	0.7	25	33	新生+沙壤
空白	—	—	—	新生+沙壤

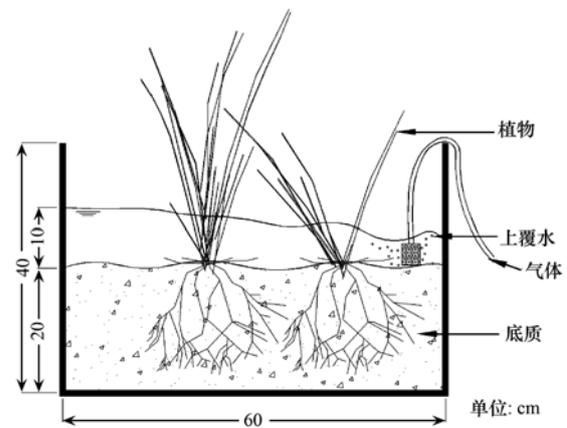


图1 植物栽种试验装置示意

Fig. 1 Diagram of experimental devices

1.3 数据采集与分析

试验开始后用曝气头模拟风浪,连续扰动至7 d监测上覆水悬浮物颗粒物浓度SS、高锰酸盐指数、总氮及总磷等指标;试验进行至14 d停止水力扰动,静止6 h后测试上述上覆水水质指标;继续水力扰动,在扰动15 d、20 d对上覆水SS、高锰酸盐指数、TN及TP等指标进行测定. 20 d试验结束时取出植物,用水清洗植物根部,筛选<1 mm须根,测定根长密度、根表面积密度与根重密度.

利用钼酸盐比色法测定水体总磷(total

phosphorus), 碱性过硫酸钾比色法测定水体总氮 (total nitrogen), 利用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤的方式测定水体悬浮颗粒物浓度 (suspended solid), 利用高锰酸盐氧化法测定水体高锰酸盐指数. 本试验中底质采用凯式定氮仪测定底质总氮, 利用高氯酸-硫酸消解法测定底质总磷与有效磷. 利用激光粒度仪测定底质粒径分布情况. 试验数据利用 EXCEL、Origin 等软件进行整理, 利用 SPSS 数学统计软件进行数据间相关性分析. 底质氮、磷释放速率为上覆水中总氮、总磷增量百分比与时间的比值, 公式为:

$$\text{释放速率} = \frac{(w_t/w_0) - 1}{t}$$

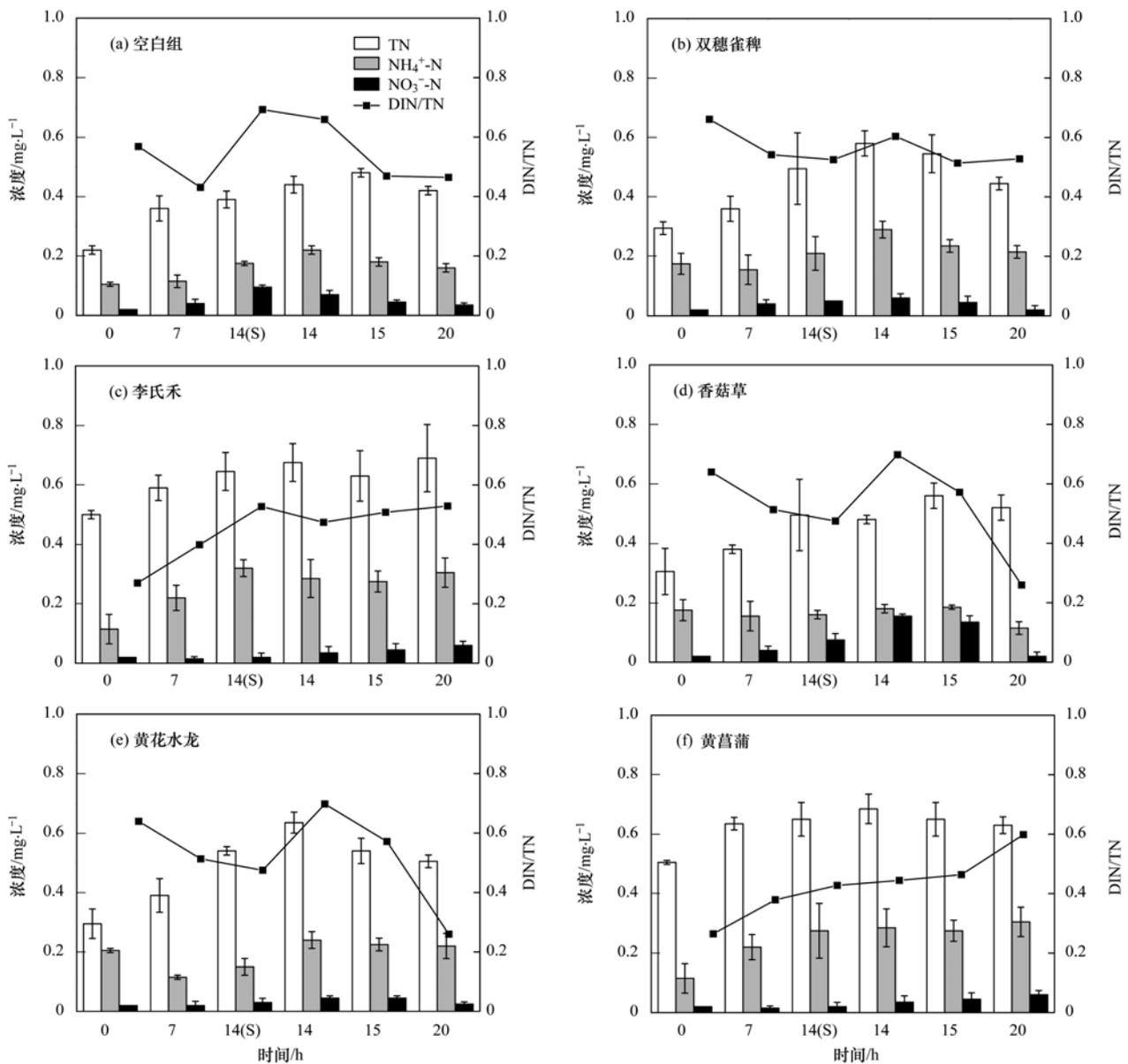
式中, w_0 为初始水体中的氮磷浓度, w_t 为试验运行 t 时间后水体中氮磷浓度, t 为试验运行时间. 试验中生物量采用试验前后测定其植物鲜重来表示, 利用 LA-S 根系分析仪测定根长密度、根表面积密度与根重密度.

2 结果与讨论

2.1 植物生长对底质中氮释放影响

2.1.1 上覆水 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化

如图 2 中所示空白组上覆水 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在试验开始前两周持续升高, TN 浓度由 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由



14(S)表示第14 d 停止扰动, 下同

图2 各试验组释放过程中上覆水 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度及比例变化情况

Fig. 2 Concentration and percentage of different forms of nitrogen (TN , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) in the process of release

$0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在第 14 d 达到 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 15 d 后 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度略有下降. 与空白组相比, 各试验组 TN 浓度在试验开始时就较高, 李氏禾组达到 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 黄菖蒲组达到 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他各组均超过 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后的两周试验中各组 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度也持续升高, 各组 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在第 14 d 或第 15 d 达到最高, 随后有所下降. 在各试验组之间, 李氏禾组 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最高, 其次为黄菖蒲组, TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度稍低的为双穗雀稗、香菇草、黄花水龙试验组. DIN 是上覆水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和溶解性 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的总和, DIN/TN 指示了可溶性无机氮占水体中 TN 的比例. 如图 2(a) 所示, 空白组的 DIN/TN 比例在试验周期前两周扰动过程中由 0.5 上升至 0.6, 第 14 d 停止扰动期间 DIN/TN 比例下降, 恢复扰动后比例也恢复至 0.6. 在各试验组中, 双穗雀稗、香菇草、黄花水龙与空白组相反, 在扰动过程中 DIN/TN 比例下降, 停止扰动 DIN/TN 比例上升; 而李氏禾、黄菖蒲 DIN/TN 比例在试验周期内持续升高. 各组的 DIN/TN 比例变化差异说明曝气扰动带来的溶解氧变化不是影响上覆水中 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的主要因素, 但水体扰动确实带来了上覆水中 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度升高. 各试验组 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度变化差异说明了李氏禾、香菇草、黄花水龙的生长会带来底质氮释放的增加.

2.1.2 底质向上覆水总氮释放差异

通过计算试验期间各组底质向上覆水释放总氮的速率, 可以发现差异主要在不同植物之间, SPSS 软件双侧 T 检验结果显示同种植物组内两种底质间的总氮释放没有显著差异 ($\alpha < 0.05$). 如图 3 所示, 空白对照组底质对上覆水 TN 的释放速率一直

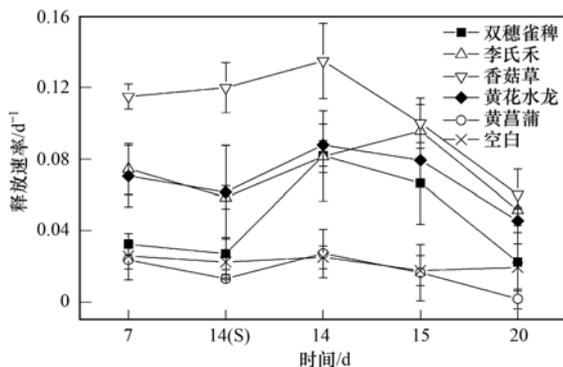


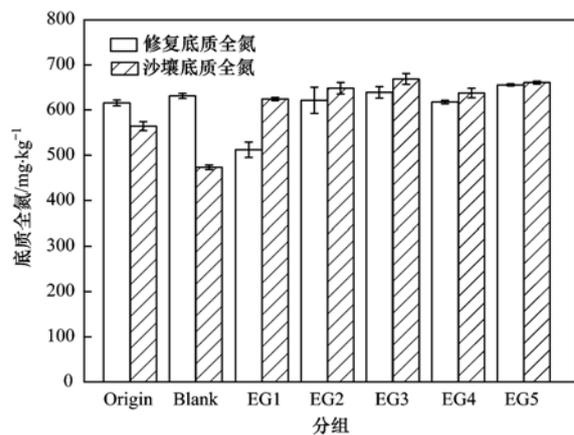
图 3 不同试验组底质对上覆水总氮释放速率

Fig. 3 Release rate of nitrogen from sediment to overlying water in experimental groups

保持在 0.02 d^{-1} , 黄菖蒲试验组的释放速率与空白组十分接近, 试验期间等于或低于 0.02 d^{-1} ; 双穗雀稗、黄花水龙试验组在扰动至 14 d 时达到最大释放率 0.08 d^{-1} , 随后持续下降, 双穗雀稗组释放率下降至 0.02 d^{-1} , 黄花水龙试验组下降至 0.045 d^{-1} ; 香菇草、李氏禾试验组释放率一直较高, 试验结束时仍然在 0.07 d^{-1} 左右. 植物生长会带来底质氮释放的增加, 尤其在试验初期, 各试验组释放率要高于空白组. 但是随着试验的进行, 双穗雀稗和黄菖蒲试验组的释放率都达到空白对照组的水平, 这两种植物的抑制氮释放的效果明显.

2.1.3 底质氮赋存情况

如图 4 所示, 空白对照组沙壤底质总氮含量在试验后下降, 修复底质总氮含量试验后小幅上升至 $650 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而各试验组的变化情况则相反, 各试验组沙壤底质总氮含量上升, 修复底质总氮含量维持在 $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 研究空白组与试验组、沙壤底质与修复底质的差异后, 可以看出植物再试验期间增加了底质中氮的含量, 增量在沙壤底质中尤为明显. 相反当底质没有植物的作用时, 氮含量则会减少. 结合 2.1.2 节中底质向上覆水氮的释放速率在试验期间普遍高于空白组, 可以认为植物在生长过程中, 根系分泌的激素、植物蛋白, 增加了底质氮的赋存, 尤其在颗粒较大的沙壤中, 植物的分泌活动愈加旺盛, 促进了底质氮的积累.



EG1、EG2、EG3、EG4、EG5 分别代表双穗雀稗、李氏禾、香菇草、黄花水龙、黄菖蒲试验组, Origin 表示试验前底质, Blank 表示空白对照组
图 4 试验前后各试验组和空白组底质氮含量

Fig. 4 Nitrogen in sediment of experimental groups at the beginning and the end of test cycle

2.2 植物生长底质中磷释放变化

2.2.1 上覆水 DTP、DIP 变化情况

如图 5(a) 所示, 空白试验组上覆水溶解性总磷

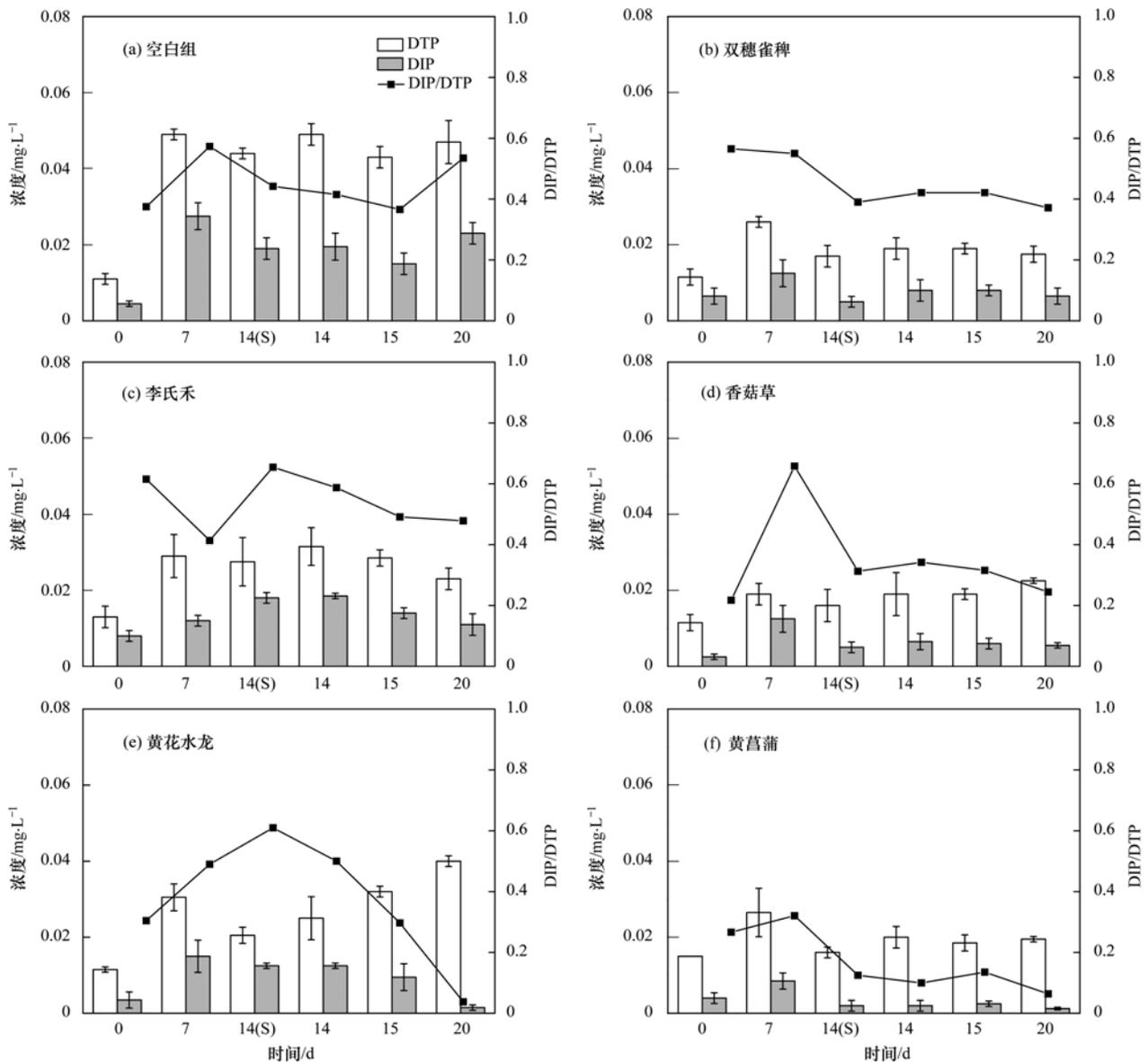


图5 各组释放过程中上覆水 DTP、DIP 的浓度及比例变化情况

Fig. 5 Concentration and percentage of different forms of phosphorus (DTP, DIP) in the process of release

DTP 在试验 0 ~ 7 d 由 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $0.055 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、溶解性无机磷 DIP 浓度由 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 14 d 后, DTP 浓度略有上升, DIP 浓度则下降至 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由图 5(b) ~ 5(f) 可知, 试验组 DTP 和 DIP 浓度低于空白组, 试验开始时各组 DTP 浓度 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0 ~ 7 d 各组浓度有不同程度的增长, 随后 7 ~ 20 d DTP 维持在一定浓度, DIP 则持续下降. 空白试验组上覆水 DTP、DIP 浓度变化情况说明底质中可溶态磷快速地上覆水释放, 在水体中到达一定浓度后在底质-上覆水界面形成平衡状态^[15]; 而各试验组 DTP、DIP 浓度的普遍偏低和下降说明了植物可以有效地抑制磷的释放. 同时可以发现 14 d 停止扰动是 DTP 浓度变

化的转折点, 14 d 前 DTP 浓度快速上升, 14 d 停止扰动时 DTP 浓度大幅下降, 当第 14 d 恢复扰动后 DTP 浓度则持续回升. 扰动带来了上覆水 DTP 浓度的增加, 而植物可以在扰动条件下减少释放的量. 空白组与各试验组 DIP/DTP 比例变化的多样性反映了上覆水磷形态受到水体理化条件、微生物、底质磷形态的多重影响^[16], 扰动不是上覆水磷形态的决定因素.

2.2.2 底质向上覆水总磷释放差异

与总氮释放情况相似的是, 底质向上覆水总磷释放差异主要在各试验组间, 试验组内两种底质的总磷释放没有显著性差异 ($\alpha < 0.05$). 如图 6 所示空白对照组和各试验组的底质释放 TP 速率在试验

开始时 0~7 d 最高,空白组达到 0.58 d^{-1} ,李氏禾、黄花水龙试验组达到 0.3 d^{-1} ,双穗雀稗、香菇草、黄菖蒲试验组达到 0.15 d^{-1} ; 试验至 20 d 空白组释放速率下降至 0.25 d^{-1} ,李氏禾、黄花水龙试验组下降至 0.1 d^{-1} ,双穗雀稗、香菇草、黄菖蒲试验组下降至 0.05 d^{-1} . 可见,与空白试验组相比,不同水生植物对底质的 TP 释放表现出显著的抑制作用,在试验前期就可以快速固定下底质中 TP,减少释放速率,在试验过程中能稳定控制释放速率,减少释放总量,使各试验组上覆水 TP 浓度低于空白对照组.

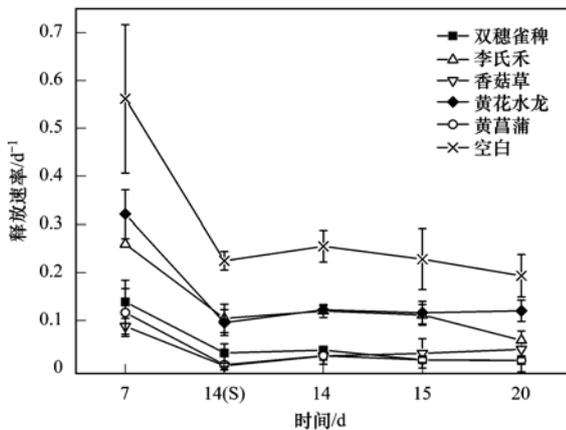


图 6 不同试验组底质对上覆水总磷释放速率
Fig. 6 Release rate of Phosphorus from sediment to overlying water in experimental groups

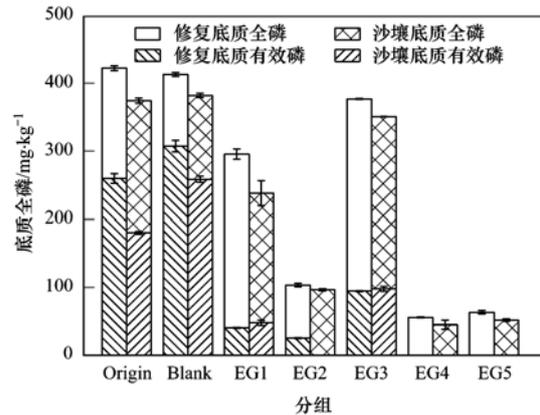
2.2.3 底质磷赋存情况

如图 7 所示,试验后空白试验组底质中总磷的含量没有明显变化,而有效磷的比例升高;各试验底质总磷、有效磷则有均大幅下降. 其中李氏禾、黄花水龙、黄菖蒲试验组底质中 TP 含量低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,双穗雀稗试验组下降至 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,香菇草下降至 $380 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各组中有效磷均低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 2.2.2 节中就已经指出了磷的释放得到了抑制,说明植物可以在试验周期内吸收利用底质中的磷.

2.3 底质氮磷释放影响因素

2.3.1 底质颗粒粒径分布情况

图 8 中曲线表示小于等于某个粒径占总颗粒物的比例,分布曲线指出试验前后两种底质的粒径分布变化根据所在试验组存在差异. 其中修复底质在试验前粒径以 $\leq 100 \mu\text{m}$ 为主,占总体的 95%; 试验后空白对照组基本保持原有分布,各试验组粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的比例提高,尤其 $20 \mu\text{m}$ 以下的细小颗粒为主要增长部分. 沙壤底质试验前 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的颗粒虽然超过 80%,但 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 的



EG1、EG2、EG3、EG4、EG5 分别代表双穗雀稗、李氏禾、香菇草、黄花水龙、黄菖蒲试验组, Origin 表示试验前底质, Blank 表示空白对照组
图 7 试验前后各试验组和空白组底质磷含量

Fig. 7 Phosphorus in sediment of experimental groups at the beginning and the end of test cycle

比例较低, $\geq 100 \mu\text{m}$ 的中等颗粒比例较高; 图 8 中试验后各组的分布曲线表明沙壤底质在部分植物的影响下粒径 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 的颗粒增加, $\geq 100 \mu\text{m}$ 的中等颗粒比例显著下降,粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的比例可以达到修复底质的水平. 图 9 反映的就是沙壤底质在不同植物的作用下粒径分布的变化情况,其中显示了底质颗粒粒径大小以及所占的比例. 试验前各组的沙壤底质 $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 的中等颗粒比例高,试验后双穗雀稗、李氏禾试验组 $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 中等颗粒比例下降,粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的比例超过 95%; 试验后黄菖蒲、香菇草试验组粒径 $\geq 100 \mu\text{m}$ 比例略有下降, $\leq 50 \mu\text{m}$ 的比例上升至 90%; 试验后空白对照组、黄花水龙试验组粒径 $\geq 100 \mu\text{m}$ 比例小幅降低,总体上与试验前差异微小. 综合上述各组具体数据,可以得出随着植物生长,底质颗粒结构发生了变化,粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 颗粒比例升高,颗粒愈发细密. 有研究指出水陆交错带的植物根系通过自身须根的穿插挤压以及分泌物显著改变底质理化特征^[17]. 试验前后沙壤底质粒径分布变化证实了双穗雀稗、李氏禾、黄菖蒲可以对底质加以改性,黄花水龙、香菇草对底质粒径的影响则较小.

2.3.2 底质颗粒物悬浮情况

上覆水中悬浮颗粒物的主要来源是水体扰动过程中上扬的底质颗粒,促进了底质与上覆水之间的物质交换^[18]. 各试验组与空白组扰动持续 7 d,上覆水悬浮颗粒物浓度 SS 达到最高值,其中空白组的增幅大于试验组. 14 d 停止扰动,即 14(S),各试验

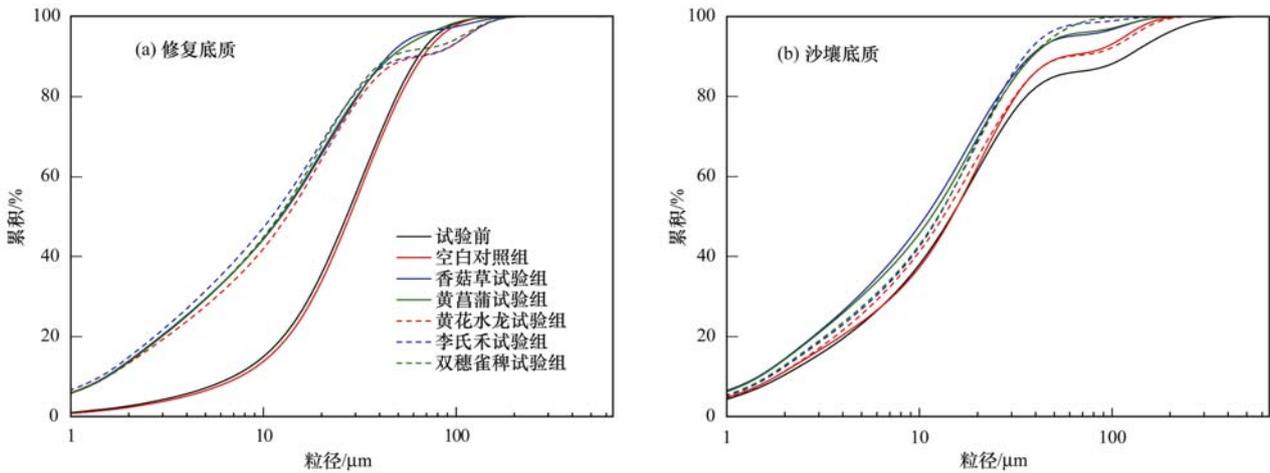


图 8 试验前后粒径分布变化

Fig. 8 Distribution of particle diameter of experimental groups before and after the test

组与空白对照组上覆水 SS 下降至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 14 d 停止扰动 6 h 后恢复水力扰动后, SS 小幅上升, 随着试验进行 (15 ~ 20 d), 各试验组中新生底质上覆水 SS 基本维持在 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各试验组中沙壤底质上覆水 SS 存在较大差异 (表 2): 空白试验组沙壤底质 SS 超过了 $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 黄花水龙在

各试验组中最高, 达到 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 黄菖蒲最低, 接近 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 双穗雀稗、李氏禾、香菇草组均达到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 对比不同试验组扰动期间的 SS 变化情况, 可以发现黄菖蒲 < 李氏禾 < 香菇草 < 双穗雀稗 < 黄花水龙 < 空白对照组. 植物生长起到了抑制底质悬浮, 减少悬浮颗粒物浓度的作用.

表 2 各试验组上覆水悬浮颗粒物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Concentration of Suspended Solid in overlaying water of experiment groups/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

时间/d	空白组		双穗雀稗组		李氏禾组	
	修复底质	沙壤底质	修复底质	沙壤底质	修复底质	沙壤底质
0	76.13 ± 5.64	61.78 ± 0.62	106.97 ± 0.43	181.37 ± 1.21	176.63 ± 23.50	247.87 ± 11.12
7	262.00 ± 16.30	358.90 ± 11.62	150.53 ± 0.14	200.52 ± 14.17	190.19 ± 28.08	300.39 ± 13.63
14(S)	175.675 ± 6.46	136.74 ± 4.82	117.53 ± 4.14	112.43 ± 2.96	90.06 ± 0.70	120.12 ± 28.12
14	200.18 ± 13.96	200.45 ± 13.99	140.19 ± 0.20	121.51 ± 1.34	100.42 ± 0.16	185.58 ± 7.82
15	189.67 ± 27.18	191.85 ± 16.44	154.45 ± 4.72	119.45 ± 8.64	104.04 ± 8.72	104.45 ± 18.86
20	209.84 ± 0.72	225.53 ± 7.38	107.60 ± 3.20	114.24 ± 9.08	91.62 ± 1.02	92.92 ± 7.65
时间/d	香菇草		黄花水龙组		黄菖蒲组	
	修复底质	沙壤底质	修复底质	沙壤底质	修复底质	沙壤底质
0	177.62 ± 3.37	262.22 ± 3.14	150.08 ± 1.45	105.00 ± 2.36	103.43 ± 2.66	185.21 ± 7.36
7	218.80 ± 1.76	260.75 ± 15.20	151.80 ± 2.49	155.72 ± 0.16	152.91 ± 3.02	167.78 ± 4.98
14(S)	147.89 ± 3.64	141.11 ± 11.00	123.10 ± 1.90	156.67 ± 29.85	122.64 ± 2.54	138.38 ± 3.98
14	156.69 ± 2.32	174.26 ± 22.46	180.78 ± 2.22	155.55 ± 6.59	29.95 ± 2.68	30.02 ± 0.05
15	125.70 ± 7.66	90.31 ± 2.00	188.94 ± 12.49	157.78 ± 6.28	31.695 ± 2.31	29.22 ± 0.46
20	105.51 ± 5.58	90.42 ± 0.52	120.90 ± 0.64	142.92 ± 10.20	24.155 ± 5.40	23.045 ± 3.37

2.3.3 植物对氮磷释放影响

如图 10 所示, 5 种植物在试验过程中长势良好, 试验后生物量增加. 黄花水龙是浮叶植物, 试验后植物鲜重达到 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 李氏禾与双穗雀稗均属于禾本科植物, 两者都有着发达的匍匐茎和根壮茎, 试验后李氏禾鲜重增加到 $0.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 双穗雀稗鲜重增加到 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 黄菖蒲是湿生/挺水植物, 枝叶茂盛, 根茎短粗, 环境适应性较好, 鲜重在试验前后有较快的增长, 增加至 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 香菇草

是一种低矮 (株高 15 cm) 的蔓生挺水/湿生植物, 生物量远远小于其他较为高大的挺水/湿生植物, 试验前后生物量增加至 $0.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

已有研究认为根长密度、根表面积密度、根重密度是反映根系特征的重要指标, 植物根系与底质理化性质变化息息相关^[19,20]. 须根长度密度可以反映一种植物根部须根的伸展情况, 须根表面积密度可以反映植物根部和底质的接触情况, 根重密度则直接体现须根的数量. 表 3 显示在选取的 5 种水陆

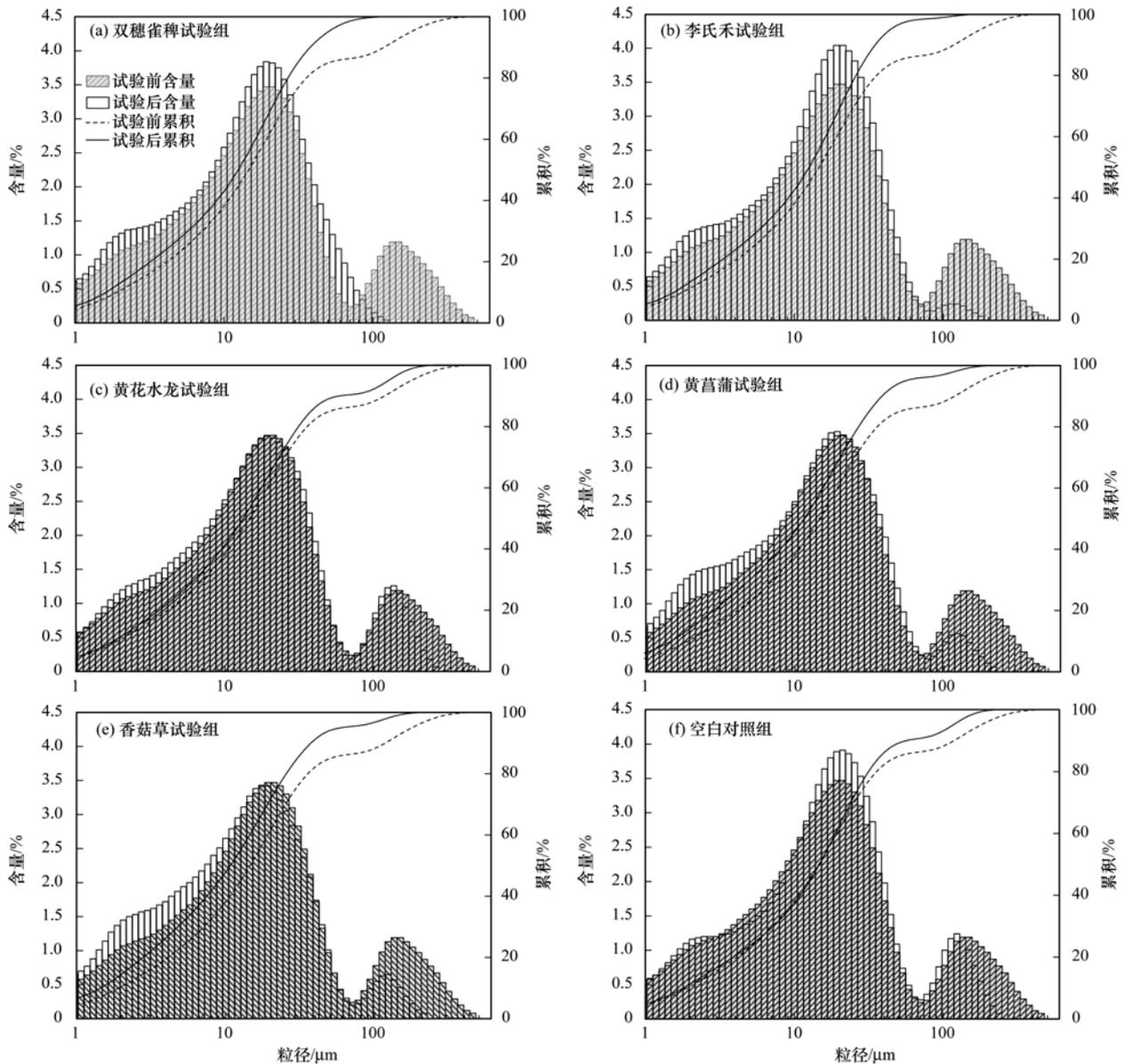


图9 试验前后土壤底质粒径构成情况

Fig. 9 Distribution of particle diameter of experimental groups before and after the test

交错带植物中,黄菖蒲的 $d \leq 1 \text{ mm}$ 须根根长密度、根表面积密度较高,而李氏禾根重密度较高,5种植物的根系参数有明显的差异,但香菇草与黄菖蒲一样有很强的适应性,可以在试验装置中快速扎根稳定.通过分析须根参数与各影响因素的相关关系,可以得出须根参数与上覆水中氮磷的释放量、底质中氮磷赋存量之间有较强的相关关系 ($P < 0.05$).根据表4中的相关系数,须根参数与底质磷的赋存量以及向上覆水的释放量均呈负相关,与底质氮的赋存量呈正相关,对上覆水氮的释放量则没有显著影响.

研究上述植物、底质、上覆水指标数据之间的相关关系发现,底质的颗粒和氮磷赋存情况受到 d

表3 5种水陆交错带植物 $d \leq 1 \text{ mm}$ 须根特征参数Table 3 Characteristic parameters of the fine root ($d \leq 1 \text{ mm}$) of 5 littoral zone plants

植物种类	根长密度 / $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$	根表面积密度 / $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$	根重密度 / $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$
双穗雀稗	1.057 ± 0.245	0.033 ± 0.007	0.678 ± 0.229
黄菖蒲	11.495 ± 1.188	0.368 ± 0.034	1.844 ± 0.467
李氏禾	7.368 ± 0.295	0.228 ± 0.009	2.537 ± 0.361
黄花水龙	9.475 ± 1.003	0.294 ± 0.058	0.944 ± 0.210
香菇草	0.651 ± 0.108	0.022 ± 0.004	0.16 ± 0.008

$\leq 1 \text{ mm}$ 的须根的直接影响^[21],根长密度、根表面积密度、根重密度与粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 的底质颗粒比例有显著的正相关关系 ($P < 0.05$).鲁素云^[22]指出部分水生植物根系通过穿插、分泌糖类、有机酸甚

表 4 氮磷释放量与影响因素相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of N and P release and influential factors

	TN 释放量	TP 释放量	底质总氮	底质总磷	上覆水 SS	根长密度	根重密度	根表面积密度	植物生物量	颗粒粒径
TN 释放量	1									
TP 释放量	0.056	1								
底质总氮	-0.059	-0.048	1							
底质总磷	-0.066	0.150 *	-0.356	1						
上覆水 SS	0.315 *	0.779 **	-0.491 *	0.516 *	1					
根长密度	-0.011	-0.117 *	0.390 *	-0.938 **	-0.553 *	1				
根重密度	-0.083	-0.148 *	0.276 *	-0.755 **	-0.539 *	0.700 **	1			
根表面积密度	-0.012	-0.115 *	0.392 *	-0.935 **	-0.551 *	1.000 **	0.700 **	1		
植物生物量	-0.172 *	0.274 *	-0.027	0.043	-0.048	0.102 *	-0.114 *	0.101 *	1	
颗粒粒径	-0.046	-0.535 *	0.289 *	-0.232 *	-0.546 *	0.126 *	0.369 *	0.125 *	-0.035	1

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

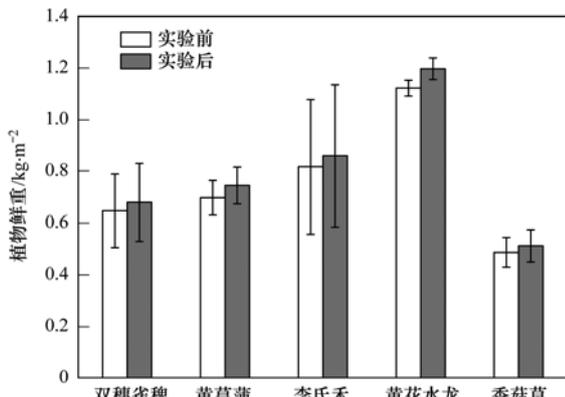


图 10 不同植物组试验前后生物量变化

Fig. 10 Biomass of experimental groups before and after the test

至腐败分解等方式促进底质在水体冲击下的稳定. 植物根系不仅通过分泌活性酶、植物激素来包裹固结底质,其自身生长对底质的穿插压实让底质的颗粒越来越细密^[23]. 试验显示上覆水 SS 与 $\leq 50 \mu\text{m}$ 的底质颗粒比例呈负相关关系 (-0.546^*),各试验组中底质颗粒改性能力强弱顺序为双穗雀稗 > 李氏禾 > 黄菖蒲 > 黄花水龙 > 香菇草 > 空白对照组,上覆水 SS 高低顺序为黄菖蒲 < 李氏禾 < 香菇草 < 双穗雀稗 < 黄花水龙 < 空白对照组,这是植物须根在底质中的生长影响着底质的颗粒粒径,同时须根通

过分泌有机物质包裹粘连底质细小颗粒,对底质的穿插挤压也使底质颗粒物变得更加细小,更易与须根紧密粘连;同时上覆水中 SS 对氮、磷释放量具有显著正线性关系,是底质氮磷释放的重要途径.

在影响底质氮磷释放的诸多因素中,以植物根长密度、根重密度、根表面积密度 3 项须根参数为主形成了主要因素 1(PAC1),以底质氮磷赋存量形成了主要因素 2(PAC2),以植物生物量形成了主要因素 3(PAC3). 在影响底质氮磷释放的因素中, PAC1 和 PAC2 产生了明显的影响, PAC1 显示 TP 释放量、底质总磷、上覆水 SS 受植物根长密度、根重密度、根表面积密度的抑制,相关分析也显示出它们之间有显著的负相关关系; PAC2 指出底质中 TP 含量直接影响着对上覆水 TP 的释放,相关分析显示底质中 TP 含量越高,TP 释放量约高,而底质中 TN 含量对上覆水 TN 的释放影响有限,相关性分析也显示两者之间没有显著的相关性. PAC3 作为唯一以单一指标形成的主要因素,其对底质理化特征及植物须根的影响较小,但对 TN、TP 释放量也具有一定影响,相关性分析也显示出植物生物量与 TN、TP 释放量分别有 -0.172^* 、 0.274^* 显著线性关系(图 11). 综上植物对底质氮磷释放有不同的

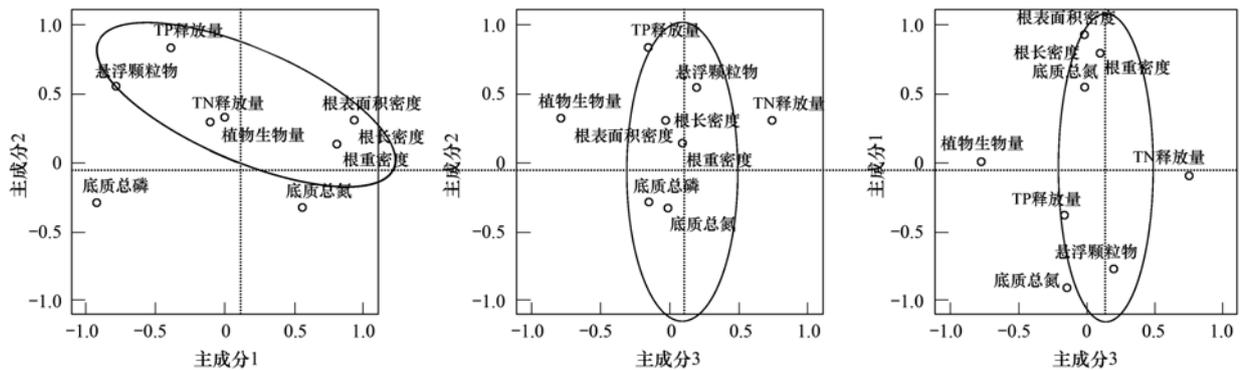


图 11 底质氮磷释放主因素分析结果

Fig. 11 Main factors affecting the release of nitrogen and phosphorus in sediments

抑制效果,这种抑制作用可以归纳为通过植物根系改变底质的颗粒构成,颗粒构成的改变减少了底质的上扬,间接减少了氮磷的释放量,还通过对底质氮磷赋存量的改变直接影响氮磷的释放;另外,植物根系对磷的吸收利用要远远高于氮,减少了磷尤其是无机态磷的释放;植物根系生长促使底质氮的积累,底质含氮物质在向上覆水释放的过程也比较缓慢,部分植物还会促使上覆水中 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N的比例提高。

3 结论

(1)植物生长促使底质颗粒结构发生了变化,粒径 $\leq 50\mu\text{m}$ 颗粒比例升高,颗粒愈发细密.各试验组中底质颗粒改性能力强弱顺序为双穗雀稗>李氏禾>黄菖蒲>黄花水龙>香菇草>空白对照组,上覆水SS与底质颗粒构成密切相关,上覆水SS高低顺序为黄菖蒲<李氏禾<香菇草<双穗雀稗<黄花水龙<空白对照组。

(2)植物生长增加了底质氮的赋存,尤其在颗粒较大的沙壤中,植物的分泌活动愈加旺盛,促进了底质氮的积累,带来底质氮释放的增加.水体扰动加剧底质向上覆水TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N的释放,但双穗雀稗和黄菖蒲这两种植物有明显的氮释放抑制作用,将释放率控制在 0.02 d^{-1} ,上覆水TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N浓度控制在 0.4 、 0.2 、 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(3)植物对底质的TP释放表现出显著的抑制作用,在试验前期就可以快速固定下底质中TP,减少释放速率,双穗雀稗、香菇草、黄菖蒲可以将上覆水TP浓度控制在 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而李氏禾、黄花水龙则为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;李氏禾、黄花水龙试验组TP释放率控制在 0.1 d^{-1} ,双穗雀稗、香菇草、黄菖蒲试验组控制在 0.05 d^{-1} 。

(4)植物对底质氮磷释放有不同的抑制效果,这种抑制作用可以归纳为通过植物根系改变底质的颗粒构成,颗粒构成的改变减少了底质的上扬,间接减少了氮磷的释放量,还通过对底质氮磷赋存量的改变直接影响氮磷的释放;另外,植物根系对磷的吸收利用要远远高于氮,减少了磷尤其是无机态磷的释放;植物根系生长促使底质氮的积累,底质含氮物质在向上覆水释放的过程也比较缓慢,部分植物还会使 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N的比例提高.几种水陆交错带植物正是通过上述机制抑制底质中氮磷的释放,其中黄菖蒲、双穗雀稗因为其发达的根系,抑制

氮磷物质释放的效果最佳,其次为李氏禾、香菇草,黄花水龙对底质氮磷释放的抑制作用在5种植物中最小。

参考文献:

- [1] 赵晓峰. 太湖湖滨带水生植物时空分布特征及其与水质因子的相互关系研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2012.
Zhao X F. The study on relationship between the spacial and temporal distribution characteristic of aquatic macrophyte and water quality factors in the Littoral Zone of Taihu Lake [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2012.
- [2] 谢杰, 吴德意, 陈雪初, 等. 滇池和洱海湖滨带水生植被状况与水质的关系研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2): 55-59.
Xie J, Wu D Y, Chen X C, et al. Relationship between aquatic vegetation and water quality in littoral zones of Lake Dianchi and Lake Erhai [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(2): 55-59.
- [3] 方焰星, 何池全, 梁霞, 等. 水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(6): 36-40.
Fang Y X, He C Q, Liang X, et al. The purifying effect of polluted water by the aquatic plants [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(6): 36-40.
- [4] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3064-3069.
Gan S, Lu S Y, Qin P F, et al. Spatial distribution and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments from western lakeside belt of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3064-3069.
- [5] 尹延震, 储昭升, 赵明, 等. 洱海湖滨带水质的时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1192-1196.
Yin Y Z, Chu Z S, Zhao M, et al. Spatial and temporal changes in water quality in aquatic-terrestrial ecotone of Lake Erhai [J]. China Environmental Science, 2011, 31(7): 1192-1196.
- [6] 叶春. 退化湖滨带水生植物恢复技术及工程示范研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Ye C. Studies on macrophyte restoration in the damaged aquatic-terrestrial ecotone and engineering demonstration [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [7] 王磊, 李冬林, 丁晶晶, 等. 太湖湖滨湿地沉积物氮磷与2种挺水植物氮磷的关系[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1523-1529.
Wang L, Li D L, Ding J J, et al. Relationship between N and P contents in sediments and two emerged plants in Taihu Lakeside wetland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1523-1529.
- [8] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland) [J]. Water Research, 2003, 37(18): 4468-4474.
- [9] Özbay H. Changes in water properties in two different macrophyte stands and in open water in a shallow freshwater lake in Turkey [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, 23(5): 1150-1154.
- [10] 伍清新, 刘杰, 游少鸿, 等. 李氏禾湿地系统净化Cr(VI)污染水体的机理研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2306-

- 2312.
- Wu Q X, Liu J, You S H, *et al.* Decontamination mechanism of Cr(VI)-polluted water in constructed wetland planted with *Leersia hexandra* Swartz [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2306-2312.
- [11] 刘丹, 白画画, 朱元荣, 等. 太湖典型植物氨基酸组成特征及其对水环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(1): 119-127.
- Liu D, Bai H H, Zhu Y R, *et al.* Characteristics and influence to overlying water of amino acids from typical plants distributed in Lake Taihu, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 119-127.
- [12] 赵凯, 李振国, 魏宏农, 等. 太湖贡湖湾水生植被分布现状(2012年)[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(3): 421-428.
- Zhao K, Li Z G, Wei H N, *et al.* The distribution of aquatic vegetation in Gonghu Bay, Lake Taihu, 2012 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(3): 421-428.
- [13] 向速林, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖东部湖湾大型水生植物分布对水质的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2881-2887.
- Xiang S L, Zhu M Y, Zheng G W, *et al.* Influence of macrophytes on water quality in the eastern bays of Lake Taihu, China [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2881-2887.
- [14] 徐新洲, 薛建辉, 吕志刚, 等. 太湖贡湖湾湖滨湿地生态功能区与植被修复研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, **37**(3): 35-40.
- Xu X Z, Xue J H, Lv Z G, *et al.* A research of ecological function area and vegetation restoration at Taihu Gonghu bay wetland [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, **37**(3): 35-40.
- [15] 何东, 张毅敏, 杨飞, 等. 太湖藻源性颗粒物降解过程中营养盐转化及其生态效应[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 899-907.
- He D, Zhang Y M, Yang F, *et al.* The transformation of the nutrient in the degradation process of the phytoplankton-derived particulate organic matter and its ecological effect [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 899-907.
- [16] 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 799-810.
- He J, Chen C Y, Deng W M, *et al.* Distribution and release characteristics of phosphorus in water-sediment interface of Lake Dianchi [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 799-810.
- [17] 徐少君, 曾波, 类淑桐, 等. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(1): 160-167.
- Xu S J, Zeng B, Lei S T, *et al.* Root features of several flooding-tolerant plants and their roles in enhancing anti-erodibility of the soil in three gorges reservoir region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(1): 160-167.
- [18] 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见. 扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1422-1426.
- Guo J R, Li D P, Liu Y J. Impacts of sediment disturbance on the distribution of suspended particle size and phosphorus [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1422-1426.
- [19] 卢少勇, 曲洁婷, 许秋瑾, 等. 贡湖湾北部退渔还湖区水、沉积物和土壤中氮的时空分布[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(11): 2234-2241.
- Lu S Y, Qu J T, Xu Q J, *et al.* Distribution of nitrogen in water, soil and sediment in water/land ecotone of returning fishpond to lake area of Northern Gonghu Bay [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(11): 2234-2241.
- [20] Janadeleh H, Alhashemi A H, Nabavi S M B. Investigation on concentration of elements in wetland sediments and aquatic plants [J]. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2016, **2**(1): 87-93.
- [21] 丁庆章, 刘学勤, 张晓可. 水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底质环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 340-348.
- Ding Q Z, Liu X Q, Zhang X K. Impacts of water level fluctuations on substrate environments of lakeshore zone of the lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 340-348.
- [22] 鲁素芸. 植物根际生态学与根病生物防治进展[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [23] 李强. 黄土丘陵区植物根系强化土壤抗冲性机理及固土效应[D]. 北京: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2014.
- Li Q. Mechanism of plant roots in improving resistance of soil to concentrated flow erosion and reinforcement in loess hilly region [D]. Beijing: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2014.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172